

УДК 523.46; 533.951

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭНЦЕЛАДА

© 2024 г. Д. В. Шохрин^а, С. И. Копнин^{б, *}, С. И. Попель^с^аНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия^бИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: kopnin@cosmos.ru

Поступила в редакцию 29.06.2024 г.

После доработки 14.08.2024 г.

Принята к публикации 16.08.2024 г.

Предложен механизм формирования плазменно-пылевой системы над освещенной солнечным излучением поверхностью Энцелада — спутника Сатурна. Показано, что в результате действия фотоэффекта, вызванного солнечным излучением, а также с учетом влияния плазмы солнечного ветра, выполняются условия для возможности подъема пылевых частиц над поверхностью спутника в результате электростатического отталкивания. На основе самосогласованной модели для описания электростатического поля и компонент плазмы, в том числе фотоэлектронов от поверхности Энцелада и фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц определены функции распределения фотоэлектронов, пылевых частиц, а также их электростатических зарядов в зависимости от высоты и угла между местной нормалью и направлением на Солнце. Также определены и высотные профили электростатических полей для соответствующих углов между местной нормалью и направлением потока солнечного излучения. Показано, что несмотря на значительное расстояние до Солнца фотоэффект играет важную роль в формировании пылевой плазмы у поверхности Энцелада. Установлено, что из-за того, что габариты Энцелада значительно уступают размерам и массе Луны, концентрация фотоэлектронов над поверхностью Энцелада может на порядок превосходить концентрацию электронов и ионов солнечного ветра, а размеры левитирующих пылевых частиц превышают характерные размеры пылевых частиц, поднимающихся над поверхностью Луны. В обратной ситуации размеры левитирующих над Энцеладом частиц заметно уступают размерам частиц, левитирующих над поверхностями космических объектов меньших размеров, чем Энцелад, например, в случае спутников Марса — Фобоса и Деймоса.

Ключевые слова: фотоэлектрические и электростатические процессы, Энцелад, пылевая плазма, солнечный ветер, левитирующие пылевые частицы

DOI: 10.31857/S0367292124100103, **EDN:** FCMFEQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Одно из удивительных творений природы — кольца Сатурна, которые представляют собой систему достаточно плоских (в сравнении с их радиусами) концентрических образований, состоящих из скопления метеороидов различных размеров (в том числе и микроскопической пыли), среди которых вращаются и достаточно крупные спутники, известные как луны Сатурна [1]. Одним из наиболее крупных колец Сатурна является кольцо E , которое простирается в пределах от $3R$ до $8R$, где $R = 60268$ км — радиус Сатурна. В на-

стоящее время известно, что это кольцо состоит преимущественно из частиц с характерными размерами от нескольких сот нанометров до нескольких микрометров [2]. Несомненный интерес представляет вопрос происхождения этих частиц: что является их источником?

Благодаря данным, полученным в результате миссий «Вояджер-1», «Вояджер-2» и «Кассини», стало известно, что у поверхности одного из спутников Сатурна, Энцелада, находящегося в кольце E , возникает рассеянное свечение лучей, скользящих вдоль этой поверхности, особенно

в южной полярной области [3, 4]. Такое расщепление, как правило, объясняется наличием атмосферы у космического тела. Однако Энцелад, имеющий эллипсоидальную форму [5], близкую к сферической, с диаметром около 500 км и средней плотностью около 1.61 г/см^3 недостаточно массивен, чтобы удержать атмосферу. Считается, что наличие вещества в экзосфере этого спутника связано не только с выбросами в результате метеорных ударов о его поверхность, но и с криовулканической активностью в южной полярной области [3]. Таким образом, благодаря этому уникальному свойству, по сравнению с остальными спутниками кольца *E* Сатурна, Энцелад представляет несомненный интерес для исследования его в качестве источника пылевых частиц в этом кольце [6]. Наряду с этим нельзя не упомянуть, что ряд авторов считают Энцелад наиболее вероятным местом в Солнечной системе, где возможно выполнение условий для зарождения жизни, хотя бы на уровне простейших организмов [7, 8]. Все это определяет важность таких направлений исследования Энцелада, как определение химического состава веществ, формирующих этот спутник [8–14], изучение ландшафта его поверхности [3, 15, 16], геологической активности [17], криовулканических процессов [18, 19] и пр. Например, анализ химического состава выбросов в результате криовулканических процессов, показал наличие, главным образом, ледяных частиц [20], а также частиц, содержащих кремний, азот, фосфор [8–14, 20, 21] и др. Все это, а также наличие температурных аномалий около поверхностных трещин, особенно в южной полярной области вблизи так называемых «тигровых полос» [15, 20], позволило предположить о существовании подповерхностного океана [18, 19, 22]. И это всего лишь малая доля исследований, посвященных Энцеладу за последние годы. Также отметим, что благодаря выбросам пылевых частиц с поверхности Энцелада и взаимодействию с плазмой солнечного ветра, вблизи этого спутника удалось наблюдать пылевую плазму [2, 23–25]. Однако эти наблюдения относятся к большим высотам относительно поверхности рассматриваемого спутника, составляющим около нескольких сот километров.

Настоящая работа посвящена моделированию формирования пылевой плазмы в непосредственной близости у поверхности Энцелада в результате взаимодействия с излучением Солнца и плазмой солнечного ветра. Определяются электростатические поля, а также параметры компонентов образовавшейся плазменно-пылевой системы.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что пылевые частицы, левитирующие над поверхностью Луны, являются неотъемлемой составной компонентой плазменно-пылевой системы лунной экзосферы (см., например, [26–33]). Электростатические силы, приводящие к подъему пылевых частиц над поверхностью Луны, возникают в результате взаимодействия этой поверхности (и пылевых частиц на ней) с потоком солнечного излучения и солнечным ветром. Энцелад также является безатмосферным космическим телом, и подобно Луне подвергается воздействию солнечного излучения и солнечного ветра. Аналогично, как и в случае с лунной поверхностью, поток солнечного излучения создает фотоэффект на поверхности Энцелада, приводящий к появлению положительного заряда на этой поверхности и формированию слоя фотоэлектронов, экранирующего положительный заряд на ней. Потоки плазмы солнечного ветра также оказывают влияние на зарядку и экранировку поверхности спутника, но, как и в случае с Луной, их учет не должен привести к изменению знака заряда поверхности. Такому же воздействию со стороны солнечного излучения, электронов и ионов солнечного ветра, а также фотоэлектронов подвергаются и пылевые частицы, расположенные на поверхности Энцелада. В результате такого воздействия эти пылевые частицы также будут приобретать положительный заряд и в результате электростатического отталкивания могут подниматься над поверхностью спутника. Такие левитирующие частицы, в свою очередь, будут являться одновременно и источниками фотоэлектронов, и стоками для электронов в независимости от их происхождения (будь то электроны солнечного ветра, фотоэлектроны от поверхности Энцелада или фотоэлектроны от поверхности пылевых частиц) и ионов солнечного ветра. Заряженные таким образом частицы под воздействием сил электростатического отталкивания и гравитационного притяжения будут совершать движения в вертикальном направлении периодически поднимаясь вверх и опускаясь вниз. Однако в результате взаимодействия со всеми компонентами плазменно-пылевой системы такие вертикальные осцилляции имеют затухающий характер

(главным образом в результате непрерывно происходящей электростатической зарядки пылевых частиц, так как параметры окружающей частицу плазмы будут меняться с изменением ее высоты над поверхностью). Таким образом, в результате этих процессов сформируется динамически равновесная плазменно-пылевая система над поверхностью спутника.

Однако в случае с Энцеладом имеет место ряд отличий по сравнению с Луной. Во-первых, расстояния от Солнца до Луны и до Энцелада отличаются примерно в десять раз, а значит и воздействие солнечного ветра и солнечного излучения на поверхность спутника Сатурна примерно на два порядка меньше аналогичного воздействия на поверхность Луны. Однако малые габариты Энцелада [5], а значит и малое значение гравитационного взаимодействия ($g \approx 11.3$ см/с) позволяют предполагать возможность электростатической левитации пылевых частиц. Во-вторых, на поверхности Луны накоплен достаточно плотный и глубокий слой несвязанных между собой частиц реголита, образованных в результате многократной бомбардировки поверхности метеороидами различных размеров. В итоге именно эти частицы и участвуют в электростатической левитации и формировании плазменно-пылевой системы над поверхностью Луны [32]. В свою очередь поверхность Энцелада покрыта водяным льдом, а пылевые частицы на поверхности Энцелада имеют различную природу происхождения. Конечно, здесь присутствуют частицы, образованные в результате ударов метеороидов о поверхность спутника. Однако также есть частицы, образованные в результате выбросов вещества при извержении криовулканов. В этом случае после извержения образуются частицы различных размеров [34, 35], нередко имеющие композитную структуру. Такие частицы состоят не только из чистой ледяной воды, но могут содержать соединения с азотом, фосфором, углеродом, а также кремнием и железом. При таких извержениях, как правило, частицы в диапазоне размеров от нескольких сот нанометров до нескольких микрометров покидают навсегда поверхность Энцелада и тем самым пополняют популяцию частиц кольца Е Сатурна. Однако более массивные частицы возвращаются обратно на поверхность спутника. Еще одним источником мелкодисперсных пылевых частиц на поверхности Энцелада могут служить тектонические процессы при возникновении крити-

ческих значений напряжения сдвига [36]. И, наконец, на поверхность Энцелада могут попадать частицы из самого кольца Е Сатурна, имеющие размеры, как правило, не превышающие несколько микрометров и состоящие большей частью из чистого водяного льда.

Таким образом, распределение частиц по размерам и физическим свойствам на поверхности Энцелада в настоящее время невозможно более или менее строго систематизировать, что является отличительной особенностью рассматриваемой задачи по сравнению с аналогичной для частиц лунного реголита.

Следует отметить тот факт, что работы [2, 23–25], в которых наблюдалась пылевая плазма, проводились, в основном для высот значительно превышающих характерный размер самого спутника Энцелада (250 км). Что касается более низких высот (ниже 100 км), наблюдаемые данные практически отсутствуют, особенно, если речь идет о приповерхностном слое (для высот порядка десятков и сот метров над поверхностью спутника). Однако, как и в случае с электростатической левитацией частиц лунного реголита, для Энцелада следует ожидать, что основная доля пылевых частиц, поднимающихся в результате электростатического отталкивания, окажется именно в приповерхностном слое на высотах, не превышающих несколько километров, а возможно и сот метров.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для описания формирования плазменно-пылевой системы над поверхностью Энцелада используется модель [37], разработанная для Луны и опробованная для ряда космических тел, например спутников Марса Фобоса и Деймоса [38–41]. Согласно этой модели, поверхность безатмосферного космического тела и пылевые частицы на этой поверхности в результате взаимодействия с потоком солнечного излучения, а также плазмой солнечного ветра приобретают положительный электростатический заряд. В пространство над поверхностью космического тела поступают фотоэлектроны и заряженные пылевые частицы, которые находятся в гравитационном поле (действует вертикально вниз) и возникшем при зарядке поверхности электростатическом поле (действует вертикально вверх). Движение заряженных пылевых частиц в этом случае носит осциллирующий характер: частицы достигают максимальной высоты,

а затем возвращаются обратно вниз и вновь устремляются вверх. Однако взаимодействие этих частиц с компонентами плазмы (электронами и ионами солнечного ветра, фотоэлектронами от поверхности космического тела, а также фотоэлектронами от самих пылевых частиц), главным образом в результате постоянно протекающей зарядки пылевых частиц (поскольку параметры плазмы в значительной степени зависят от высоты над поверхностью), приводит к тому, что такие осцилляции носят затухающий характер (см, например, [38, 39]) с выходом частиц на определенный равновесный уровень. Поскольку при этом распределение заряженных компонент плазменно-пылевой системы оказывает влияние на величину и конфигурацию электростатического поля, а конфигурация этого поля оказывает влияние на распределение всех компонент пылевой плазмы, и принимая во внимание переменный характер заряда пылевых частиц и их динамику, данную задачу можно решить только численным итерационным методом последовательных приближений.

Согласно методу, изложенному в [37], в нулевом приближении следует пренебречь фотоэлектронами, порожденными поверхностями пылевых частиц. Распределение фотоэлектронов от поверхности Энцелада в зависимости от высоты выводится из системы, состоящей из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов f_e

$$V_h \frac{\partial f_e}{\partial h} + \frac{e}{m_e} \frac{\partial \phi}{\partial h} \frac{\partial f_e}{\partial V_h} = 0, \quad (1)$$

где V_h — их скорость вдоль вертикальной оси h , ось h направлена вертикально вверх, m_e — масса электрона, $-e$ — заряд электрона, ϕ — самосогласованный электростатический потенциал, и уравнения Пуассона для этого потенциала с граничными условиями, характеризующими изменение потенциала у поверхности Энцелада и на бесконечном удалении от нее (обычно у поверхности считают потенциал равным нулю, а на бесконечно удаленном расстоянии принимают напряженность поля, равной нулю),

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial h^2} = -4\pi\rho. \quad (2)$$

Здесь ρ — объемная плотность заряда над поверхностью Энцелада. В общем случае эта плотность является суммой абсолютно всех заряженных компонент, формирующих плазменно-пылевую систему:

$$\rho = \rho_{eS} + \rho_{e,ph,Surf} + \rho_{e,ph,dust} + \rho_{dust} + \rho_{iS},$$

где $\rho_{e(i)S}$ — плотность заряда электронов (ионов) солнечного ветра, $\rho_{e,ph,Surf}$ — плотность заряда фотоэлектронов от поверхности Энцелада, $\rho_{e,ph,dust}$ — плотность заряда фотоэлектронов от поверхности пылевых частиц, ρ_{dust} — плотность заряда пылевых частиц, левитирующих над поверхностью спутника.

В нулевом приближении можно считать, что функция распределения фотоэлектронов f_e по энергиям подчиняется максвелловскому распределению с параметрами, характеризующимися концентрацией N_0 и температурой $T_{e,ph}$ фотоэлектронов у поверхности Энцелада (при $h = 0$).

Параметры N_0 и $T_{e,ph}$ легко вычислить, если определить функцию распределения фотоэлектронов $\Phi(E_e)$ по энергиям E_e у поверхности Энцелада:

$$N_0 = \int_0^\infty \Phi_e(E_e) dE_e, \quad (3)$$

$$T_{e,ph} = \frac{2}{3} \langle E_e \rangle = \frac{2}{3N_0} \int_0^\infty E_e \Phi_e(E_e) dE_e. \quad (4)$$

Определение функции $\Phi(E_e)$ производится стандартным образом [42] на основе расчета плотности потока фотоэлектронов в результате воздействия солнечного излучения на поверхность Энцелада

$$\Phi_e(E_e) dE_e = 2 \cos \theta \sqrt{\frac{2m_e}{E_e}} \cdot$$

$$\int_{E_e+W}^\infty Y(E_{ph}) F_{ph}(E_{ph}) dE_{ph} d\psi, \quad (5)$$

где E_{ph} — энергия фотона, $Y(E_{ph})$ — квантовый выход, зависящий от энергии фотонов, W — работа выхода фотоэмиссии, θ — угол между местной нормалью и направлением на Солнце, $F_{ph}(E_{ph}) dE_{ph}$ — плотность потока фотонов с энергией E_{ph} в интервале dE_{ph} ,

$$d\psi = \frac{6(E_m - E_e)}{E_m^3} E_e dE_e \quad (6)$$

— вероятность [42] испускания электрона с энергией E_e в интервале dE_e при поглощении фотона с энергией E_{ph} . Следует отметить, что $0 \leq E_e \leq E_m = E_{ph} - W$. В выражении (5) коэффициент 2 возникает благодаря тому, что в условии динамического равновесия поток фотоэлектронов, исходящих с поверхности, равен потоку фотоэлектронов, возвращающихся на эту поверхность. При выводе выражения (5) пренебрегалось

неровностями поверхности Энцелада, учет которых может привести к анизотропии функции распределения фотоэлектронов по энергиям.

При вычислении функции $\Phi(E_e)$ необходимо знать спектр солнечного излучения $F_{ph}(E_{ph})$, квантовый выход $Y(E_{ph})$ и работу выхода W для поверхности Энцелада. Поскольку поверхность Энцелада, главным образом, состоит из водяного льда, будем полагать $W = 8.7$ эВ, что соответствует работе выхода чистого льда [43], при этом квантовый выход будет определяться следующим выражением [44]:

$$Y(E_{ph}) = C_Y (E_{ph} - W)^2, \quad (7)$$

где коэффициент $C_Y = 10^{-4}$ эВ $^{-2}$.

Стоит отметить, что поток солнечного излучения варьируется в зависимости от активности Солнца. Однако эти вариации (особенно в наиболее значимом с точки зрения фотоэффекта ультрафиолетовом диапазоне энергий) не приводят к значительным (на порядки величины) отличиям в окончательных результатах вычисления параметров N_0 и $T_{e,ph}$. Поэтому в качестве примера для численных расчетов взята спектральная плотность потока фотонов солнечного излучения вблизи Энцелада, соответствующая максимальной солнечной активности в 11-летнем цикле. График этого спектра представлен на рис. 1а. По форме эта плотность потока соответствует форме спектральной плотности у поверхности Луны [45, 46], однако из-за значительной удаленности Энцелада от Солнца интегральная интенсивность потока солнечного излучения вблизи поверхности спутника Сатурна оказывается около 15 Вт/м $^{-2}$, что составляет около 1.1% значения Солнечной постоянной для земной орбиты.

Вычисленные таким образом параметры фотоэлектронов N_0 и $T_{e,ph}$ у поверхности Энцелада согласно выражениям (1)–(5) с учетом (6) и (7) для спектра солнечного излучения, соответствующего максимальной солнечной активности в одиннадцатилетнем цикле и значением для работы выхода $W = 8.7$ эВ имеют следующие значения: $N_0 \approx 1.26 \cos \theta$ см $^{-3}$ и $T_{e,ph} \approx 7.89$ эВ. При этом функция распределения фотоэлектронов у поверхности Энцелада, нормированная на единицу ($\int_0^\infty f_e(E_e) dE_e = 1$) принимает вид, приведенный на рис. 1б (сплошная линия). Штриховой линией на рис. 1б обозначена максвелловская функция распределения фотоэлектронов по энергиям, со-

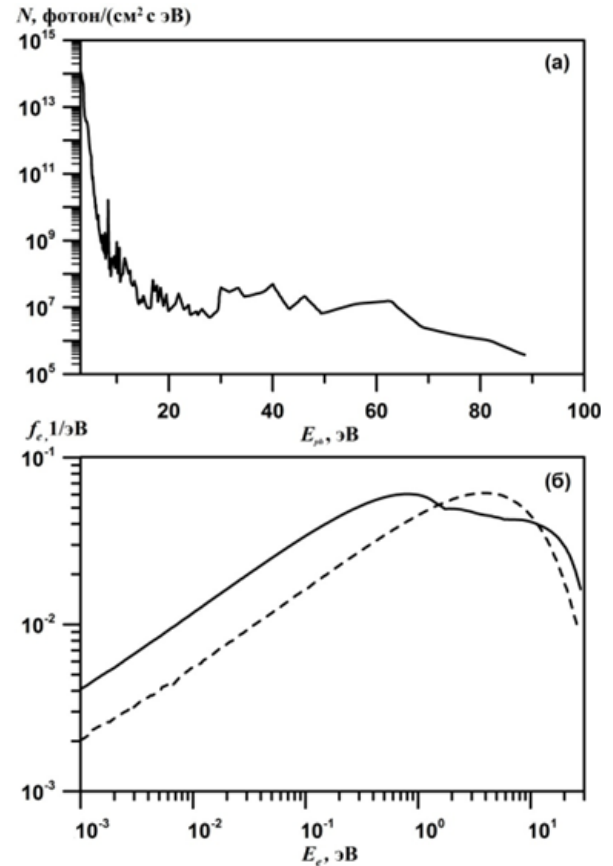


Рис. 1. Спектральная плотность потока фотонов солнечного излучения вблизи Энцелада, соответствующая максимальной солнечной активности в 11-летнем цикле (а). Функция распределения фотоэлектронов f_e по энергиям (сплошная кривая) над поверхностью Энцелада в светлое время суток и максвелловская функция распределения фотоэлектронов (штриховая кривая) по энергиям, соответствующая средней температуре фотоэлектронов, вычисленной как среднеквадратичная энергия, определенная с использованием функции распределения фотоэлектронов f_e .

ответствующая ранее определенной средней температуре фотоэлектронов $T_{e,ph} \approx 7.89$ эВ.

Таким образом, над заряженной поверхностью Энцелада формируется электростатическое поле $E(h, \theta)$, направленное вертикально вверх, которое в нулевом приближении (без учета влияния плазмы солнечного ветра и левитирующих пылевых частиц) описывается выражением [37, 47, 48]

$$E(h, \theta) = \frac{2T_{e,ph}}{e} \frac{\sqrt{\cos \theta/2}}{\lambda_D + h\sqrt{\cos \theta/2}}, \quad (8)$$

где λ_D – радиус Дебая у поверхности Энцелада. Под действием этого поля пылевые частицы, которые также приобретают положительный заряд,

могут начать подниматься над поверхностью спутника в том случае, если электростатическая сила отталкивания будет превышать силу гравитационного притяжения.

Динамика таких частиц описывается выражением

$$m_d \frac{d\mathbf{v}_d}{dt} = q_d \mathbf{E} + \frac{q_d}{c} \mathbf{v}_d \times \mathbf{B} + m_d \mathbf{g}_0, \quad (9)$$

где m_d , q_d , $\mathbf{v}_d$ — масса, заряд и вектор скорости пылевой частицы соответственно, $\mathbf{B}$ — вектор магнитного поля магнитосферы Сатурна вблизи поверхности Энцелада, $\mathbf{g}_0$ — ускорение свободного падения у поверхности спутника. Следует отметить, что изменение заряда происходит согласно уравнению, описывающему зарядку пылевых частиц,

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d). \quad (10)$$

Здесь $I_{e(i)}(q_d)$ — электрические токи электронов (ионов) солнечного ветра на поверхность пылевой частицы, $I_{ph}(q_d)$ — ток, вызванный фотоэффектом с поверхности пылевой частицы, возникающий в результате воздействия солнечного излучения, $I_{e,ph}(q_d)$ — обратный ток фотоэлектронов на пылевую частицу. Предполагая, что пылевые частицы будут иметь положительный заряд в результате действия фотоэффекта для описания вышеупомянутых токов, следует использовать следующие выражения:

$$I_e(q_d) = -\pi a^2 n_{eS} \sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{eS}} \right), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_i(q_d) = & \pi a^2 n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \\ & + \left\{ \frac{u_i + u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i - u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) + \right. \\ & + \frac{u_i - u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i + u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) + \\ & + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{u_i + u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{u_i - u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) \right] \\ & \cdot \left. \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{a T_{iS}} + \frac{u_i^2}{u_{Ti}^2} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} I_{ph}(q_d) = & -\pi a^2 e N_0 \sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}} \cdot \\ & \cdot \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}} \right) \exp\left(-\frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

$$I_{e,ph}(q_d) = -\pi a^2 e n_{e,ph} \sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}} \right). \quad (14)$$

Здесь a — размер пылевой частицы, $Z_d = q_d/e$ — ее зарядовое число, m_i — масса иона, $n_{e(i)S}$ и $T_{e(i)S}$ — концентрация и температура электронов (ионов) солнечного ветра, u_i — скорость солнечного ветра, $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS}/m_i}$ — тепловая скорость ионов солнечного ветра, $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2 / a m_i}$, $n_{e,ph}$ — общая концентрация фотоэлектронов как с поверхности Энцелада, так и с поверхностей пылевых частиц. Следует уточнить, что выражение (12) для ионного тока $I_i(q_d)$ выведено в предположении положительного заряда пылевых частиц для произвольных скоростей потоков ионов u_i [49]. Отметим, что в предположении, когда поверхность Энцелада и пылевые частицы имеют одинаковую работу выхода, выражение (13) для силы тока $I_{ph}(q_d)$, вызванного фотоэффектом, удастся представить в более простом виде, в котором спектральные характеристики солнечного излучения представлены в качестве интегральных параметров N_0 и $T_{e,ph}$. Приведенные выражения для электрических токов (11)–(14) были впервые использованы при описании формирования пылевой плазмы у поверхности безатмосферных космических тел (в экзосфере Луны) в работе [29]. В этой же работе обосновывается возможность использования выражения для фототока в приведенном выше виде (13).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Систему уравнений (9), (10), описывающую динамику и зарядку пылевых частиц, можно упростить. Во-первых, в окрестности Энцелада величина магнитного поля Сатурна оказывается около $3 \cdot 10^{-3}$ Гс [50], что сопоставимо с величиной магнитного поля в области магнитных аномалий для лунной поверхности [51]. В этом случае вклад слагаемого в правой части уравнения (9), содержащего магнитное поле, пренебрежимо мал по сравнению с вкладом сил, действующих со стороны электростатического и гравитационного полей. В таком приближении система уравнений

(9), (10) (без учета слагаемого, связанного с магнитным полем) совместно с (11)–(14) имеет осциллирующие решения с малым затуханием (см., например, [33]). Причем затухание вызвано диссипативными процессами в результате зарядки пылевых частиц, характеризующихся частотой (ср. [52])

$$\nu_q = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{aV_{Te,ph}}{\lambda_D^2} \left(1 + \frac{Z_{d0}e^2}{aT_{e,ph}} \right) \cdot \exp \left(-\frac{Z_{d0}e^2}{aT_{e,ph}} \right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{aV_{TeS}}{\lambda_{DeS}^2}. \quad (15)$$

Здесь индекс 0 характеризует равновесное значение зарядового числа Z_{d0} , а $V_{Te,ph} = \sqrt{T_{e,ph}/m_e}$, $V_{TeS} = \sqrt{T_{eS}/m_e}$ – характерные тепловые скорости фотоэлектронов и электронов солнечного ветра соответственно, $\lambda_{DeS} = \sqrt{T_{eS}/4\pi n_{eS}e^2}$ – радиус Дебая электронов солнечного ветра. Частота ν_q определяет время релаксации электрического заряда пылевой частицы до равновесного значения. Отметим, что при выводе выражения (15), ионным током следует пренебречь, как током значительно меньшим по величине по сравнению с остальными токами (I_e , I_{ph} и $I_{e,ph}$).

Известно, что продолжительность светлого времени суток на Энцеладе T_E составляет примерно 0,7 земных суток, т. е. $T_E \approx 6 \cdot 10^4$ С. Это время значительно превосходит характерное время релаксации $2/\nu_q$ вертикальных осцилляций пылевых частиц [52]

$$2/\nu_q \ll T_E. \quad (16)$$

Это означает, что вертикальные колебания пылевых частиц затухают гораздо раньше, чем заканчивается светлое время суток на Энцеладе. Таким образом, в течение большей части времени пылевые частицы можно представить, как частицы, левитирующие на определенной высоте над поверхностью Энцелада. В рассматриваемом случае неравенство (16) выполняется для подавляющего количества пылевых частиц, способных подняться над поверхностью Энцелада. В этом случае для определения параметров плазменно-пылевой системы над поверхностью Энцелада в зависимости от высоты систему уравнений (9), (10) можно решать в стационарном приближении

$$q_d \mathbf{E} + m_d \mathbf{g}_0 = 0, \quad (17)$$

$$I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d) = 0. \quad (18)$$

Самосогласованное решение уравнений (17), (18) и уравнения Пуассона (2) удается получить численно итерационным методом. На первом этапе для определения распределения пылевых частиц $n_d(h, a)$ по размерам в зависимости от высоты следует использовать выражение (8) для напряженности электростатического поля, полученное в нулевом приближении (когда над поверхностью Энцелада существуют только фотоэлектроны от этой поверхности). Подниматься будут те частицы, которые приобретают положительный заряд на поверхности Энцелада и для которых сила электростатического отталкивания будет превосходить силу гравитационного притяжения. Поскольку в настоящее время функция распределения частиц по размерам на поверхности Энцелада неизвестна, в качестве такого распределения была выбрана аналогичная функция распределения, известная для лунного реголита (см., например, [33, 37]). Далее определяются параметры плазменно-пылевой системы: общая концентрация $n_d(h)$, средний размер $a_{mid}(h)$ и заряд $q_d(h) = eZ_d(h)$ пылевых частиц в зависимости от высоты, а также концентрация фотоэлектронов $n_{e,ph}(h)$, поступающих в пространство уже не только от поверхности Энцелада, но и от самих левитирующих частиц. На следующем этапе вновь численно решается система уравнений (2), (17) и (18) с правой частью уравнения Пуассона, учитывающей уже весь найденный на предыдущем этапе электростатический заряд на каждой высоте, и т. д. пока решение не выйдет на стационар.

Таким образом, на основе физико-математической модели, представленной в настоящей работе, можно определить параметры плазменно-пылевой системы у поверхности Энцелада, например, такие как высотные зависимости для концентрации пылевых частиц $n_d(h)$, их максимального размера $a(h)$ для данной высоты и электрического заряда $Z_d(h)$, а также электростатического поля $E(h)$ и концентрации фотоэлектронов $n_{e,ph}(h)$, поступающих в пространство от поверхности Энцелада и от самих левитирующих частиц. При численных расчетах были использованы следующие данные: работа выхода материала поверхности и пылевых частиц $W = 8.7$ эВ; спектры солнечного излучения, соответствующие максимуму солнечной активности в 11-летнем цикле (рис. 1а) на основе которых были получены параметры, характеризующие токи, вызванные фотоэффектом, и обратный ток фотоэлектронов:

$N_0 \approx 1.26 \cos \theta \text{ см}^{-3}$ и $T_{e,ph} \approx 7.89 \text{ эВ}$; параметры, характеризующие плазму солнечного ветра в окрестностях Энцелада: $n_{eS} \approx n_{iS} \approx 0.1 \text{ см}^{-3}$, $T_{eS} \approx 10 \text{ эВ}$, $u_i \approx 400 \text{ км/с}$. На рис. 2 представлены соответствующие результаты расчетов для углов $\theta = 0^\circ$ (рис. 2а), $\theta = 82^\circ$ (рис. 2б), $\theta = 85^\circ$ (рис. 2в), $\theta = 88^\circ$ (рис. 2г).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена физико-математическая модель, описывающая формирование плазменно-пылевой системы у поверхности Энцелада в светлое время суток, когда в результате взаимодействия поверхности спутника и пылевых частиц, на этой поверхности с электромагнитным излучением Солнца, а также плазмой солнечного ветра происходит зарядка этой поверхности и пылевых частиц на ней. Несмотря на значительную удаленность Энцелада от Солнца, фотоэффект ока-

зывается важным процессом, влияющим на формирование плазменно-пылевой системы у поверхности спутника. Приобретаемый положительный заряд поверхности создает электростатическое поле, которое действует на одноименные положительно заряженные частицы на этой поверхности, увлекая их вверх. При этом в пространство над поверхностью поступают фотоэлектроны, которые активно участвуют в экранировании электростатического поля и зарядке вовлеченных в вертикальное движение пылевых частиц, создавая обратный ток фотоэлектронов на их поверхности. Поскольку электростатическое поле убывает с высотой в результате его экранирования, каждая частица, достигая определенной, максимальной, высоты в зависимости от своего размера, устремляется обратно вниз под действием силы гравитационного притяжения. В этом случае движения частиц носят колебательный

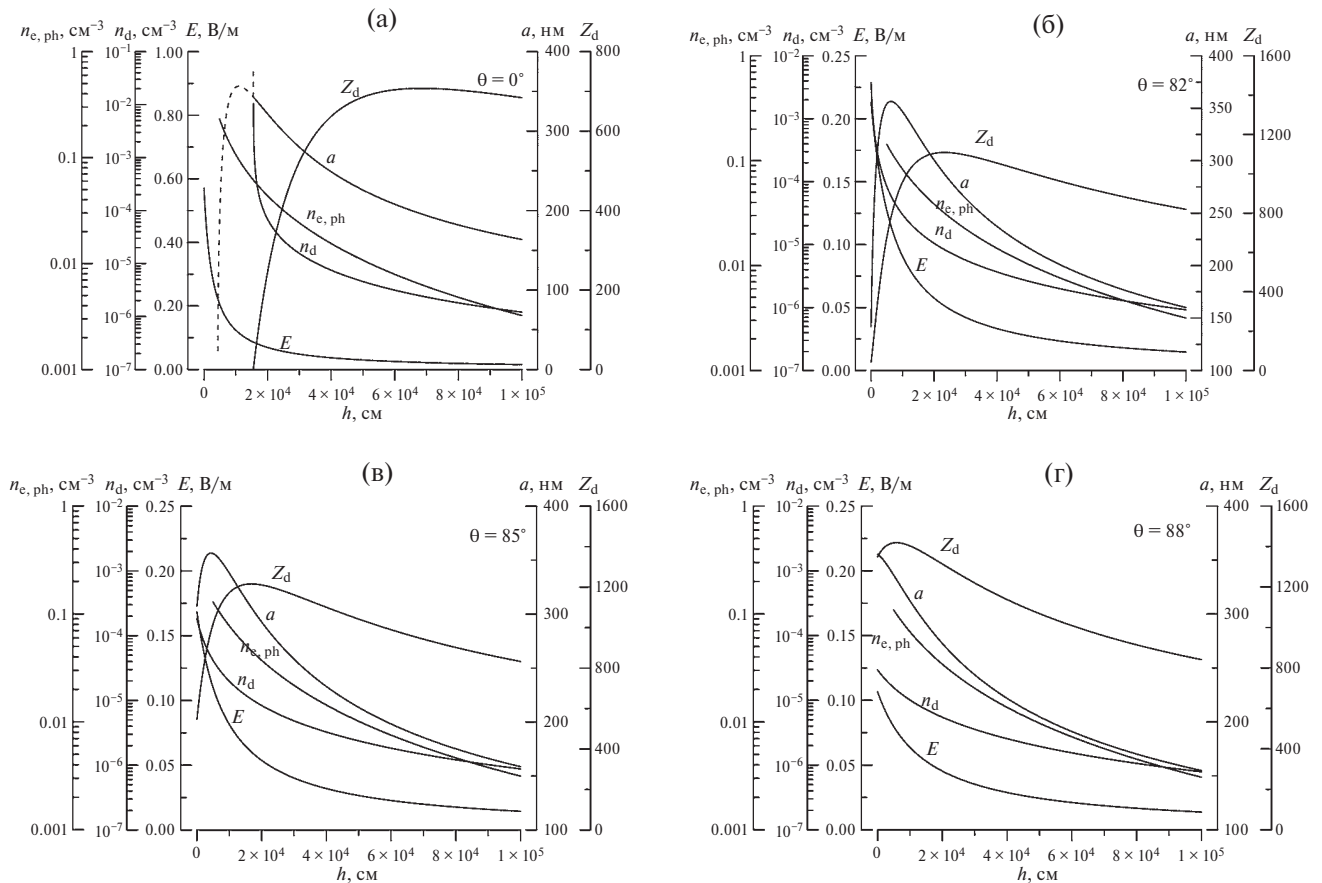


Рис. 2. Высотные зависимости для концентрации пылевых частиц $n_d(h)$, их максимального размера $a(h)$ для данной высоты и электрического заряда $Z_d(h)$, а также электростатического поля $E(h)$ и концентрации фотоэлектронов $n_{e,ph}(h)$, поступающих в пространство от поверхности Энцелада и от самих левитирующих частиц, для углов $\theta = 0^\circ$ (а), $\theta = 82^\circ$ (б), $\theta = 85^\circ$ (в), $\theta = 88^\circ$ (г). Штриховые части кривых соответствуют условию неустойчивого равновесия для левитирующих пылевых частиц.

характер с малым затуханием, определяемым, главным образом, процессами зарядки. Оказывается, что характерное время релаксации таких колебаний для подавляющего количества частиц много меньше светлого времени суток на Энцеладе и, благодаря этому, частицы приходят к своему положению равновесия, левитируя на определенных высотах в соответствии со своими размерами. На основе изложенной физико-математической модели получены характерные высотные профили для концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей для различных углов θ . Показано, что над поверхностью Энцелада поднимаются частицы с характерными размерами 0.2–0.4 мкм, что превышает размеры пылевых частиц, левитирующих в этих условиях над поверхностью Луны (около 0.1 мкм [37]), но оказываются значительно меньшими для космических объектов меньших размеров, чем Энцелад, например, для спутников Марса Фобоса и Деймоса (около нескольких микрометров [40, 41]). При этом характерные концентрации для пылевых частиц над поверхностью Энцелада составляют порядка 10^{-4} – 10^{-2} см $^{-3}$, концентрация фотоэлектронов у поверхности Энцелада может достигать около 1 см $^{-3}$, что на порядок выше значений для электронов и ионов плазмы солнечного ветра.

Интересно отметить, что в рамках миссии «Кассини» проводились измерения [53] размеров пылевых частиц с помощью аппаратуры the Cassini Radio and Plasma Wave Science, которые показали возможность существования, в том числе и в окрестностях Энцелада, частиц с размерами около 0.2 мкм. Однако измеренные при этом концентрации частиц были на несколько порядков ниже полученных в рамках представленной в этой статье модели. Это различие, обусловлено тем, что в настоящей работе представлено рассмотрение концентраций частиц в непосредственной близости к поверхности спутника (на высотах от нескольких сот метров до нескольких десятков километров), тогда как измерения «Кассини» [53] проводились на существенно больших расстояниях от Энцелада.

Таким образом, предложена самосогласованная модель для описания плазменно-пылевой системы в непосредственной близости поверхности Энцелада. Для усовершенствования этой модели необходимо иметь более определенные данные о параметрах плазменно-пылевой системы

в окрестности Энцелада, в частности, распределение частиц по размерам на поверхности спутника, более детальный их химический состав и т. д., которые, как надеются авторы, будут определены в результате дальнейшего анализа данных, полученных в миссии «Кассини». Следует подчеркнуть, что эта модель является стационарной и не может быть использована для описания нестационарных процессов, возникающих, например, в области терминатора. Также, по аналогии с Луной (см. [33, 54]), несмотря на малую величину магнитного поля Сатурна вблизи Энцелада, может оказаться важным влияние этого поля на перенос пылевых частиц и на развитие плазменных неустойчивостей. Все это подразумевает необходимость дальнейшего развития модели, что предполагается осуществить в будущем.

Статья подготовлена по материалам доклада на 20-м Международном совещании «Сложные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением — 2024» (CSCPIER-2024), Москва, 8–12 апреля 2024 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Porco C.C., Baker E., Barbara J., Beurle K., Brahic A., Burns J.A., Charnoz S., Cooper N., Dawson D.D., Del Genio A.D., Denk T., Dones L., Dyudina U., Evans M.W., Giese B., Grazier K., Helfenstein P., Ingersoll A.P., Jacobson R.A., Johnson T.V., McEwen A., Murray C.D., Neukum G., Owen W.M., Perry J., Roatsch T., Spitale J., Squyres S., Thomas P., Tiscareno M., Turtle E., Vasavada A.R., Veverka J., Wagner R., West R. // *Science*. 2005. V. 307. P. 1226.
2. Yaroshenko V.V., Ratynskaia S., Olson J., Brenning N., Wahlund J.-E., Morooka M., Kurth W.S., Gurnett D.A., Morfill G.E. // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. P. 1807.
3. Porco C.C., Helfenstein P., Thomas P. C., Ingersoll A.P., Wisdom J., West R., Neukum G., Denk T., Wagner R., Roatsch T., Kieffer S., Turtle E., McEwen A., Johnson T.V., Rathbun J., Veverka J., Wilson D., Perry J., Spitale J., Brahic A., Burns J.A., DelGenio A.D., Dones L., Murray C.D., Squyres S. // *Science*. 2006. V. 311. P. 1393.
4. Pitman K.M., Buratti B.J., Mosher J.A., Bauer J.M., Momary T.W., Brown R.H., Nicholson P.D., Hedman M.M. // *Astrophys. J.* 2008. V. 680. P. L65.
5. Thomas P.C., Burns J.A., Helfenstein P., Squyres S., Veverka J., Porco C., Turtl E.P., McEwen A., Denk T., Giese B., Roatsch T., Johnson T.V., Jacobson R.A. // *Icarus*. 2007. V. 190. P. 573.
6. Spahn F., Schmidt J., Albers N., Horning M., Makuch M., Seiß M., Kempf S., Srama R., Dikarev V., Helfert S.,

- Moragas-Klostermeyer G., Krivov A.V., Sremcevic M., Tuzzolino A.J., Economou T., Grun E.* // Science. 2006. V. 311. P. 1416.
7. *Parkinson C.D., Liang M.-C., Yung Y.L., Kirschvink J.L.* // Orig. Life Evolution Biosph. 2008. V. 38. P. 355.
 8. *Hao J., Glein C.R., Huang F., Yee N., Catling D.C., Postberg F., Hillier J.K., Hazen R.M.* // PNAS. 2022. V.119. P. e2201388119.
 9. *Postberg F., Schmidt J., Hillier J., Kempf S., Srama R.* // Nature. 2011. V. 474. P. 620.
 10. *Kieffer S.W., Lu X., Bethke C.M., Spencer J.R., Marshak S., Navrotsky A.* // Science. 2006. V. 314. P. 1764.
 11. *Waite J.H., Glein C.R., Perryman R.S., Teolis B.D., Magee B.A., Miller G., Grimes J., Perry M.E., Miller K.E., Bouquet A., Lunine J.I., Brockwell T., Bolton S.J.* // Science. 2017. V. 356. P. 155.
 12. *Waite J.H. Jr., Combi M.R., Ip W.-H., Cravens T.E., McNutt R.L. Jr., Kasprzak W., Yelle R., Luhmann J., Niemann H., Gell D., Magee B., Fletcher G., Lunine J., Tseng W.-L.* // Science. 2006. V. 311. P. 1419.
 13. *Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J., Cruikshank D.P., Barnes J.W., Mastrapa R.M.E., Bauer J., Newman S., Momary T., Baines K.H., Bellucci G., Capaccioni F., Cerroni P., Combes M., Coradini A., Drossart P., Formisano V., Jaumann R., Langevin Y., Matson D.L., McCord T.B., Nelson R.M., Nicholson P.D., Sicardy B., Sotin C.* // Science. 2006. V. 311. P. 1425.
 14. *Hansen C.J., Esposito L., Stewart A.I.F., Colwell J., Hendrix A., Pryor W., Shemansky D., West R.* // Science. 2006. V. 311. P. 1422.
 15. *Spencer J.R., Pearl J.C., Segura M., Flasar F.M., Marmoutkine A., Romani P., Buratti B.J., Hendrix A.R., Spilker L.J., Lopes R.M.C.* // Science. 2006. V. 311. P. 1401.
 16. *Rothery D.A.* Satellites of the Outer Planets: Worlds in Their Own Right. N.Y.: Oxford University Press, 1999. 264 p.
 17. *Efroimsky M.* // Icarus. 2018. V. 300. P. 223.
 18. *Collins G.C., Goodman J.C.* // Icarus. 2007. V. 189. P. 72.
 19. *Gioia G., Chakraborty P., Marshak S., Kieffer S.W.* // PNAS. 2007. V.104. P.13578.
 20. *Newman S.F., Buratti B.J., Brown R.H., Jaumann R., Bauer J., Momary T.* // Icarus. 2008. V. 193. P.397.
 21. *Tokar R.L., Johnson R.E., Hill T.W., D.H. Pontius, Kurth W.S., Crary F.J., Young D.T., Thomsen M.F., Reisenfeld D.B., Coates A.J., Lewis G.R., Sittler E.C., Gurnett D.A.* // Science. 2006. V. 311. P. 1409.
 22. *Iess L., Stevenson D.J., Parisi M., Hemingway D., Jacobson R.A., Lunine J.I., Nimmo F., Armstrong J.W., Asmar S.W., Ducci M., Tortora P.* // Science. 2014. V. 344. P. 78.
 23. *Farrell W.M., Kurth W.S., Tokar R.L., Wahlund J.-E., Gurnett D.A., Wang Z., McDowall R.J., Morooka M.W., Johnson R.E., Waite J.H. Jr.* // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. P. L20202.
 24. *Morooka M.W., Wahlund J.-E., Eriksson A.I., Farrell W.M., Gurnett D.A., Kurth W.S., Persoon A.M., Shafiq M., André M., Holmberg M.K.G.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. A12221.
 25. *Engelhardt I.A.D., Wahlund J.-E., Andrews D.J., Eriksson A.I., Ye S., Kurth W.S., Gurnett D.A., Morooka M.W., Farrell W.M., Dougherty M.K.* // Planet. Space Sci. 2015. V. 117. P. 453.
 26. *Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M.* // Advances Space Res. 2006. V. 37. P. 59.
 27. *Sternovsky Z., Chamberlin P., Horányi M., Robertson S., Wang X.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A10104.
 28. *Stubbs T.J., Glenar D.A., Farrell W.M., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Delory G.T.* // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. P. 1659.
 29. *Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Попель С.И.* // Письма ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 198.
 30. *Лусин Е.А., Тараканов В.П., Петров О.Ф., Попель С.И., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Фортков В.Е.* // Письма ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 755.
 31. *Буринская Т.М.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 17.
 32. *Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A. Yu.* // Planet. Space Sci. 2018. V. 156. P. 71.
 33. *Popel S.I., Golub' A.P., Kassem A.I., Zelenyi L.M.* // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. P. 013701.
 34. *Schmidt J., Brilliantov N., Spahn F., Kempf S.* // Nature. 2008. V. 451. P. 685.
 35. *Postberg F., Kempf S., Schmidt J., Brilliantov N., Beinsen A., Abel B., Buck U., Srama R.* // Nature. 2009. V. 459. P. 1098.
 36. *Rossi C., Cianfarra P., Salvini F., Bourgeois O., Tobie G.* // J. Geophys. Res.: Planets. 2020. V. 125. P. e2020JE006471.
 37. *Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н.* // Астрономич. Вестн. 2013. Т. 47. С. 455.
 38. *Голубь А.П., Попель С.И.* // Письма ЖЭТФ. 2021. Т. 113. С. 440.
 39. *Голубь А.П., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 741.
 40. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // Письма ЖЭТФ. 2017. Т. 106. С. 469.
 41. *Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 635.
 42. *Walbridge E.* // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3668.
 43. *Кдумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И.* // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. С. 171.
 44. *Schmitt-Ott A., Schurtenberger P., Siegmann H.C.* // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 1284.

45. Chamberlin P.C., Woods T.N., Eparvier F.G. // Space Weather. 2008. V. 6. P. S05001.
46. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н., Афонин В.В., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Лусин Е.А., Петров О.Ф. // Письма ЖЭТФ. 2014. Т. 99. С. 131.
47. Колесников Е.К., Мануйлов А.С. // Астрономич. Ж. 1982. Т. 59. С. 996.
48. Колесников Е.К., Яковлев А.Б. // Астрономич. вестн. 1997. Т. 31. С. 70.
49. Losseva T.V., Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu.N., Shukla P.K. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 013703.
50. Dougherty M.K., Khurana K.K., Neubauer F.M., Russell C.T., Saur J., Leisner J.S., Burton M.E. // Science. 2006. V. 311. P. 1406.
51. Попель С.И., Голубь А.П., Кассем А.И., Зеленый Л.М. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 451.
52. Попель С.И., Голубь А.П. // Письма ЖЭТФ. 2022. Т. 115. С. 629.
53. Ye S.-Y., Gurnett D.A., Kurth W.S. // Icarus. 2016. V. 279. P. 51.
54. Popel S.I., Kassem A.I., Izvekova Yu.N., Zelenyi L.M. // Phys. Lett. A. 2020. V. 384. P. 126627.

ELECTROSTATIC EFFECTS AND FORMATION OF DUSTY PLASMA ABOVE THE SURFACE OF ENCELADUS

D. V. Shokhrin^a, S. I. Kopnin^{b, *}, and S. I. Popel^b

^a*National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000, Russia*

^b*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia*

^{*}*e-mail: kopnin@cosmos.ru*

A mechanism of formation of plasma-dust system above the surface of Enceladus, the Saturn moon, illuminated by the solar radiation is proposed. It is demonstrated that the photoelectric effect caused by the sunlight and the influence of the solar-wind plasma create conditions for lifting of dust particles above the surface of the moon as a result of electrostatic repulsion. Based on a self-consistent model describing the electrostatic field and plasma components, including photoelectrons emitted from the Enceladus surface and those emitted from the surface of the dust particles, distribution functions of photoelectrons, dust particles, and their electrostatic charges are determined as functions of altitude and the angle between the local normal and the direction to the Sun. Also determined are the altitude profiles of the electrostatic fields for the corresponding angles between the local normal and the direction of the solar radiation. It is demonstrated that the photoelectric effect plays an important role in formation of dusty plasma near the Enceladus surface despite considerable distance from the Sun. It is established that concentration of photoelectrons above the Enceladus surface can exceed concentration of electrons and ions of the solar wind by an order of magnitude, and the size of the levitating particles is larger than the characteristic size of dust particles lifted above the surface of the Moon due to the fact that Enceladus is much smaller than the Moon. On the contrary, the size of particles levitating above Enceladus is much smaller than the size of particles levitating above the surface of celestial objects smaller than the Enceladus, e.g., the Martian satellites Phobos and Deimos.

Keywords: photoelectric and electrostatic processes, Enceladus, dusty plasma, solar wind, levitating dust Particles